



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Yalıtkan/Yarıiletken Ara Yüzeyin Kendiliğinden Biriken Tek katman Tekniği ile Organik Alan Etkili Transistör (OFET) Performansına Etkisi

 Tuğbahar YILMAZ ALIÇ^{a,b*}

^a*Selçuk Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 42075 Selçuklu, Konya, Türkiye.*

^b*Bordeaux Üniversitesi, IMS Laboratuvarı, UMR 5218, ENSCBP, 33607, Pessac, Fransa.*

tugbahanyilmazalic@selcuk.edu.tr

DOI : 10.29130/dubited.554914

ÖZET

Kendiliğinden Birikme, yüzeylerin fonksiyonelleştirilmesi için etkili bir teknilerden biridir. Kendiliğinden biriken moleküller (Self-assembled monolayers, SAM), iletken/yarıiletken ve yalıtkan/yarıiletken yüzeyler üzerine oluşturulabilir ve çeşitli teknolojik uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu çalışmada, kendiliğinden biriken tek katman molekülleri kullanılarak Organik Alan Etkili Transistörlerin yalıtkan/yarıiletken ara yüzeyi fonksiyonelleştirilerek aygıt performansı artırılması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Ara yüzey modifikasyonu, Fenilboronik Asit (PBA) ve türevleri, Kendiliğinden Biriken Tekkatman, OFET.*

The Effect of the Insulator/Semiconductor Interface on Transistor Performance with Self-Assembly Monolayer Technique

ABSTRACT

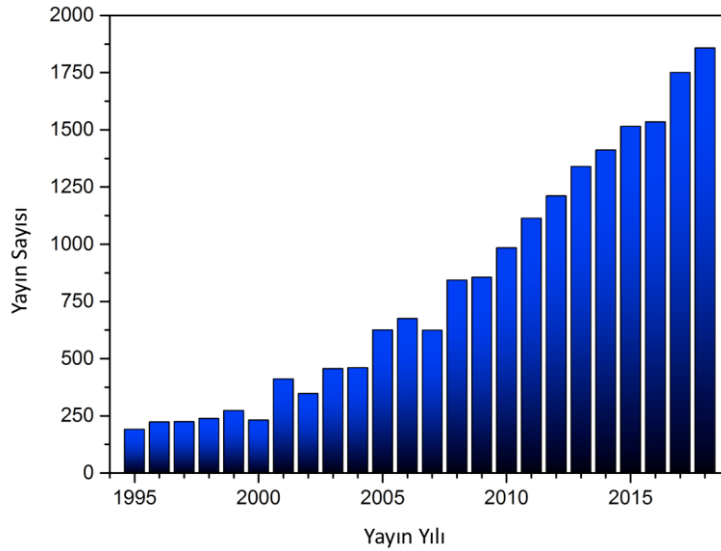
Self-assembly is one of the most effective techniques for surface functionalization. Self-assembled monolayers (SAMs) can be formed on conductor/semiconductor and dielectric/semiconductor surfaces, and have been used in a variety of technological applications. In this work aims to increased performance of Organic Field Effect Transistors using self-assembled monolayers molecules on dielectric/semiconductor surface.

Keywords: *Interface modification, Phenylboronic Acid (PBA) ve its derivatives, Self-Assembly Monolayer, OFET*

I. GİRİŞ

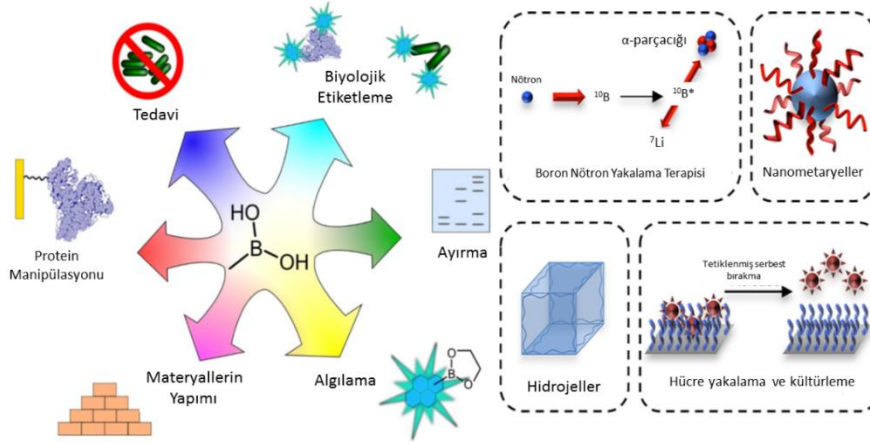
Transistör teknolojisi, 1940'ların sonlarında Bell Laboratuvarında ilk silikon tabanlı transistörün geliştirilmesi ile 20. Yüzyılın önemli teknolojik gelişmeleri arasında yerini almıştır [1-3]. Malzeme biliminin ilerlemesi, uygulama alanlarının genişlemesi ve sürekli değişen talepler Organik Alan Etkili Transistör (OFET) teknolojisinin ilerlemesinde önemli bir rol oynamıştır.

1970'lerin sonunda konjuge polimerlerin sentezinin keşfi optoelektronik aygıt teknolojisinde önemli adımlar atılmasına yol açmıştır [4]. Ebisawa ve ark., tarafından aktif yarıiletken katman için poliasetilen kullanılarak ilk organik transistör üretilmiştir [5]. Yarıiletken olarak politiyofen kullanarak ilk katı hal alan etkili transistörü Tsumura ve ark., üretmeyi başardılar [6]. Bu çalışma organik büyük moleküllerin aygıt üretiminde kullanılabilirliğini göstermiştir. Yarıiletken malzemelerin optoelektronik özelliklerinin değiştirilebilmesi ve optimize edilebilmesinin keşfi ile OFET teknolojisi ve bu alanda yapılan bilimsel çalışmaların artmış olduğu Şekil 1'de görülmektedir [7]. Robotik, savunma, uzay, ekran teknolojileri gibi çok geniş bir uygulama alanına sahip olan OFET teknolojisinin hem cihaz performansın iyileştirilmesi hem de ticarileştirilmesi için optimizasyon çalışmalarının sürdürülmesi gerekmektedir [8-11].



Şekil 1. Organik Alan Etkili Transistörlerin (OFET'lerin) yıllara göre yayın sayısı (Science Direct, [7]).

Şekil 2'de de gösterildiği gibi farklı uygulama alanlarına sahip olan boronik asit işlevselleştirilebilir bir moleküldür. Bu sebeple boronik asit ve türevi olan moleküller farklı özellikleri ve uygulama alanları nedeniyle dikkat çekmektedir. Boronik asit ve türevi moleküller, tip 1 diyabetin saptanması ve tedavisi, sensörler ve nanomalzemeler olmak üzere bir dizi biyomedikal uygulamada kullanılmaktadır. Boronik asit içeren makromoleküllerin diğer biyomedikal uygulamaları potansiyel HIV bariyerleri, ayırma (separation) ve kromatografi, hücre yakalama ve kültür, enzimatik inhibisyon ve özel radyasyon terapisi gibi kullanımları içerir [12, 13]. Mevcut uygulama alanlarının her birine yönelik olmasının yanı sıra boronik asitler giderek farklı araştırma alanlarında kullanılmaktadır [14, 15].



Şekil 2. Boronik asit molekülleri ve türevlerinin bazı uygulama alanları.

Boronik asit ve türevi moleküllerle yapılan çalışmalar, üretilen aygıtlar (transistörler, sensörler gibi) genel olarak tıbbi uygulamalar ile ilişkilendirilmiştir [16-18]. Optoelektronik aygıtların performansının iyileştirilmesi ve geliştirilmesi çalışmaları henüz yeterli değildir.

Geleneksel transistörlerde yalıtkan/yarıiletken arayüzeyinde meydana gelen akım sızıntılarından dolayı transistörlerin yük hareketliliği değerlerinin düşük olması, yalıtkan yüzeyinde meydana gelen histerisis etkisi, geniş kullanım alanına sahip olan transistör teknolojisi açısından oldukça önemli bir problemdir [19, 20]. Bu problemin aşılmasına, yalıtkan/yarıiletken arayüzeyinin morfolojik ve elektriksel özelliklerinin kendiliğinden biriken tekkatman molekülleri kullanılarak yüksek performansa sahip kararlı organik alan etkili transistörlerin elde edilmesi bir çözüm olarak sunulabilir.

Bu çalışmada, SiO₂ yalıtkan yüzeyi üzerinde boronik asit türevi SAM moleküllerinin kendiliğinden birikme yöntemi yardımıyla yalıtkan yüzey üzerinde morfolojik ve elektriksel özelliklerinin belirlenmesi, yüksek mobilite ve I_{on}/I_{off} değerlerine sahip, kararlı ve yüksek performanslı OFET'lerin üretilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca bu çalışma, OFET'lerin yük taşıma özelliklerinin belirlenmesinde yalıtkan/yarıiletken arayüzeyinin önemini vurgulamaktadır.

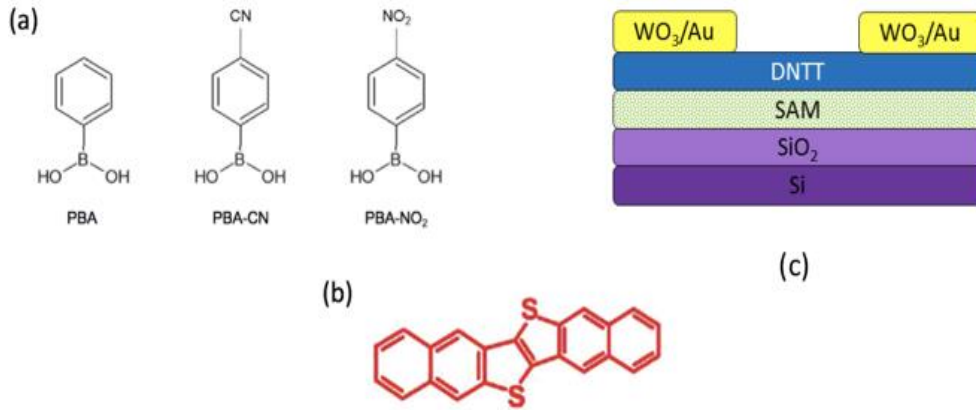
II. DENEYSEL SİSTEM

A. OFET'LERİN ÜRETİMİ

Ticari olarak satın alınan yüksek oranda doplanmış *n*-Si/SiO₂ yalıtkan yüzey üzerinde şekilde 3(a)'da gösterilen Fenilboronik Asit (PBA) ve türevi olan kendiliğinden biriken tekkatman (SAM) molekülleri ile şekilde 3(b)'da gösterilen yüksek yük hareketliliğine ve kararlılığa sahip p-tipi Dinafto[2,3-b:2', 3'-f]tiyeno[3,2-b]tiyofen (DNFT) [21, 22] organik yarıiletkeni kullanılarak elde edilen OFET'ler Şekil 3(c)'de gösterilen gibi üst kontak/alt kapı (TC/BG) geometri yapısına göre hazırlanmıştır.

PBA ve türevi SAM molekülleri, 10⁻³ M olacak şekilde *tetrahidrofur*an (THF) çözücüsü kullanılarak oda sıcaklığında 24 saat karıştırılmıştır. 1.5 cm x 1.5 cm boyutlarında, *n*-Si üzerine 200 nm kalınlığa sahip SiO₂ (15 nF/cm²) yüzeyler sırasıyla aseton, etanol ve propanol içerisinde 10 dakika ultra sonik banyo yardımıyla yıkama işlemi yapıldıktan sonra 20 dakika boyunca UV'ye maruz bırakılarak temizleme işlemi yapılmıştır. *n*-Si/SiO₂ yüzeylerine üzerine kendiliğinden birikme sürecinin

gerçekleşmesi için, temizlenmiş yüzeyler elde edilen SAM çözeltisi içerisinde oda sıcaklığında 24 saat bekletilmiştir.



Şekil 3. (a) Fenilboronik Asit esaslı SAM moleküllerinin ve (b) Dinafto[2,3-b:2', 3'-f]tiyeno[3,2-b]tiyofen (DNTT) 'nin kimyasal yapıları (c) *n*-Si/SiO₂ yüzeyleri üzerinde SAM molekülleri biriktirilerek üretilen OFET'lerin kesit görüntüsü

SAM molekülleri yalıtkan film tabakaları üzerine biriktirildikten sonra, yarıiletken katman fiziksel buharlaştırma tekniği (PVD) ile 30 nm kalınlıkta 2×10^{-6} mbar basınç altında ~ 0.1 Å/min buharlaşma hızı ve maske yardımıyla elde edilmiştir. Kaynak ve Akaç elektrotlar yarıiletkenin en düşük dolu olmayan moleküler orbital (LUMO) enerji seviyesi ile uyumlu olarak WO₃/Au, 2×10^{-6} mbar basınç altında 50 µm kanal uzunluğuna, 1 mm kanal genişliğine sahip maske yardımıyla, 0.1 - 0.5 nm/s kaplama oranı ile sırasıyla 10 nm / 60 nm kalınlıkta yarıiletken ince film üzerine PVD yardımıyla buharlaştırılarak elde edilmiştir. Tüm OFET yapıları aynı koşullar altında üretilmiş olup, elektriksel ölçümleri glovebox sistemi içerisinde alınmıştır.

B. OFET'LERİN KARAKTERİZASYONU

Yüksek oranda doplanmış *n*-Si/SiO₂ yalıtkanı kullanılarak üretilen OFET'lerin performans karakteristikleri (çıkış karakteristiği ve transfer karakteristiği) glovebox içerisinde Keithley model 4200 yarıiletken karakterizasyon cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Çıktı (Output) karakteristiği ölçümleri, OFET'in kapı elektrot ile kaynak elektrot arasına 0 V ile - 60 V ($\Delta V_{gs} = 6$ V) arasında değişen gerilimler ile uygulanan V_{gs} değeri için kaynak ile akaç elektrotları arasındaki akım (I_{ds}), bu elektrotlara uygulanan gerilimin (V_{ds}) fonksiyonu olarak çizilmiştir. Transfer karakteristiği ölçümleri, doyum bölgesinde, kaynak-akaç arasına $V_{ds} = -60$ V iken; kapı-kaynak elektrotları arasına $V_{gs} = 10 - (-60)$ V gerilim uygulanmıştır. Böylece Akaç-kaynak arasındaki (I_{ds}) akımının, kapı-kaynak elektrotları arasına uygulanan gerilime (V_{gs}) göre değişim grafiği ile OFET'in performans parametreleri belirlenmiştir. Yüzeylerin morfolojik analizleri, oda koşullarında "yarı-kontak" mod kullanılarak NT-MDT INTEGRA Solaris model Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) yardımıyla yapılmıştır.

III. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Şekil 4(a)&(b), PBA ve türevi SAM molekülleri, *n*-Si/SiO₂ yalıtkan yüzeyi üzerinde biriktirilmesiyle elde edilen OFET'lerin transfer ve çıktı karakteristiği grafiklerini göstermektedir. Şekil 4(b)'de verilmiş olan çıktı karakteristiği elde edilen bütün transistörlerde benzer özellik göstermektedir.

$$\mu_{lin} = \frac{L}{C_i W V_{ds}} \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{gs}} \quad (1)$$

$$\mu_{sat} = \frac{2L}{C_i W} \left(\frac{\partial \sqrt{I_{ds}}}{\partial V_{gs}} \right)^2 \quad (2)$$

$$SS = \frac{\partial V_{gs}}{\partial (\log I_{ds})} \quad (3)$$

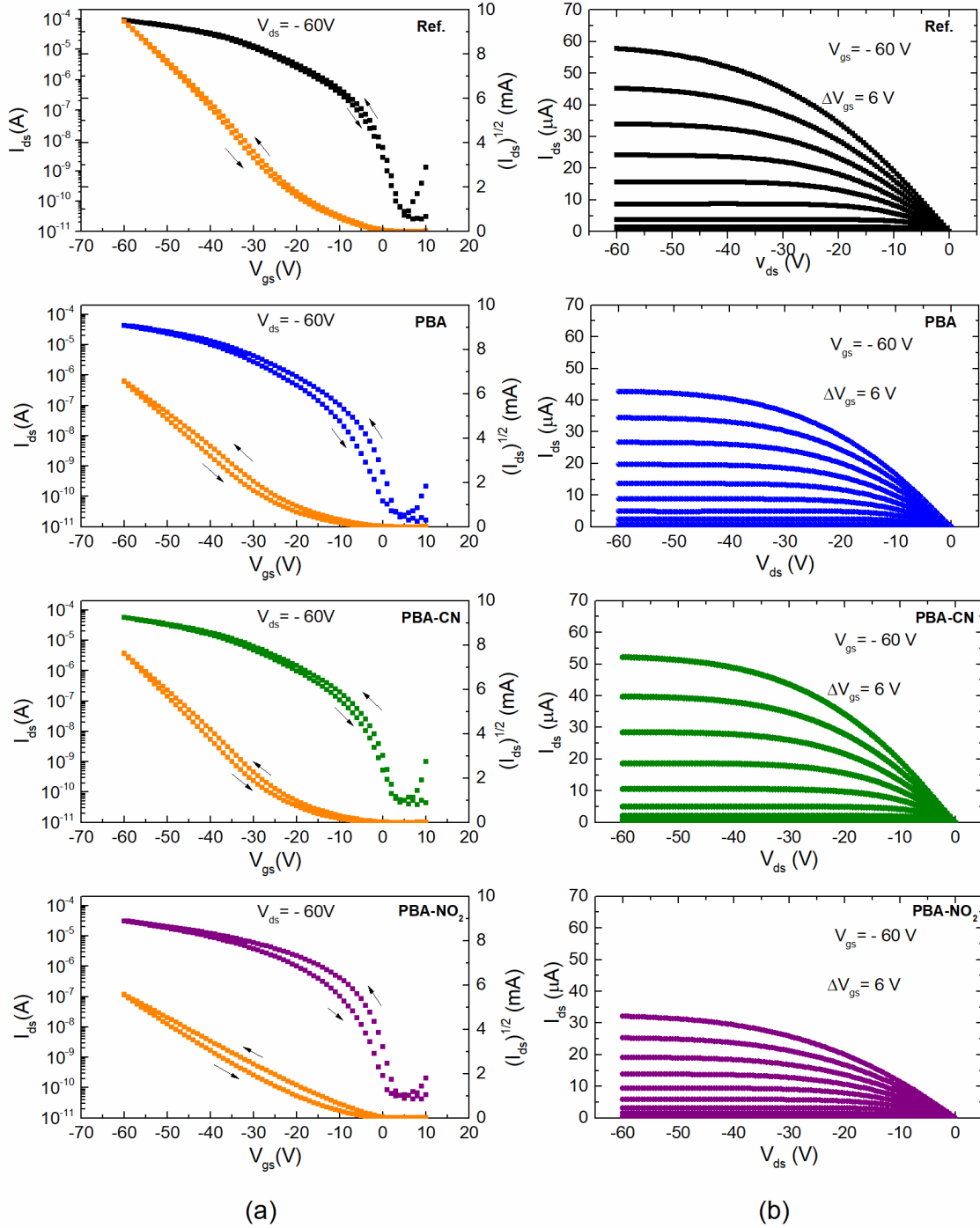
Şekil 4(a)'da OFET'lerin $V_{ds} = -60$ V gerilim altında kapı geriliminin tükenim bölgesinden yığınım bölgesine taranmasıyla açık ve kapalı konumdaki akım-gerilim karakteristiğini gösteren transfer karakteristikleri ($I_{ds} - V_{gs}$) verilmiştir. Tüm OFET yapılarının transfer karakteristikleri dikkate alınarak, eşik gerilim (V_{th}) değerleri (I_{ds})^{1/2} ve V_{gs} eğrisinin doğrusal kısmının x-ksenini kestiği nokta dikkate alınarak, linear bölgedeki boşluk hareketliliği (*Denk. 1*, μ_{lin}), doyum bölgesindeki boşluk hareketliliği (*Denk. 2*, μ_{sat}), arayüzey tuzak seviyelerinin dağılımını tespit etmek amacıyla eşik gerilim altı eğrisi (*Denk. 3*, *Subthreshold Slope*, SS), hesaplanarak Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. *n*-Si/SiO₂ yalıtkan yüzey üzerinde biriktirilen PBA ve türevi SAM molekülleri ile elde edilen OFET'lerin elektriksel parametreleri.

	μ_{lin} (cm ² /Vs)	μ_{sat} (cm ² /Vs)	V_{th} (V)	I_{on}/I_{off}	SS (V/dec)
Ref.	0.15±0.017	0.11±0.017	-13.40±1.02	0.8x10 ⁶	5.98
PBA	0.13±0.008	0.17±0.040	-17.90±0.950	1.4x10 ⁶	4.97
PBA-CN	0.16±0.010	0.24±0.041	-16.2±2.682	1.7x10 ⁶	7.33
PBA-NO₂	0.07±0.010	0.08±0.012	-6.93±2.487	0.6x10 ⁶	3.96

Grafikte gösterilen eğrilerden anlaşılacağı gibi SAM molekülü kullanılarak üretilen transistörlerin, referans transistöre göre elektriksel karakteristiklerinin iyileşmiş olduğu görülmektedir. Referans transistöre göre, PBA ve PBA-CN ile elde edilmiş transistörlerin açık ve kapalı durumundaki akım değeri oranı (I_{on}/I_{off})'nın artmış olduğu görülmektedir. SAM molekülleri, kontak elektrolardan DNTT yarıiletkeni ile ayrıldığında SAM moleküllerinin direnci yarıiletkene göre daha büyük olmaktadır. Böylece kaynak ve akaç elektrot arasındaki akım azaltmıştır. Bu sebeple SAM molekülleri ve WO₃/Au kaynak-akaç elektrotlar arasındaki DNTT yarıiletkeni boşluk akışını azalttığı için referans transistöre göre daha düşük I_{off} değeri görülmüştür [23].

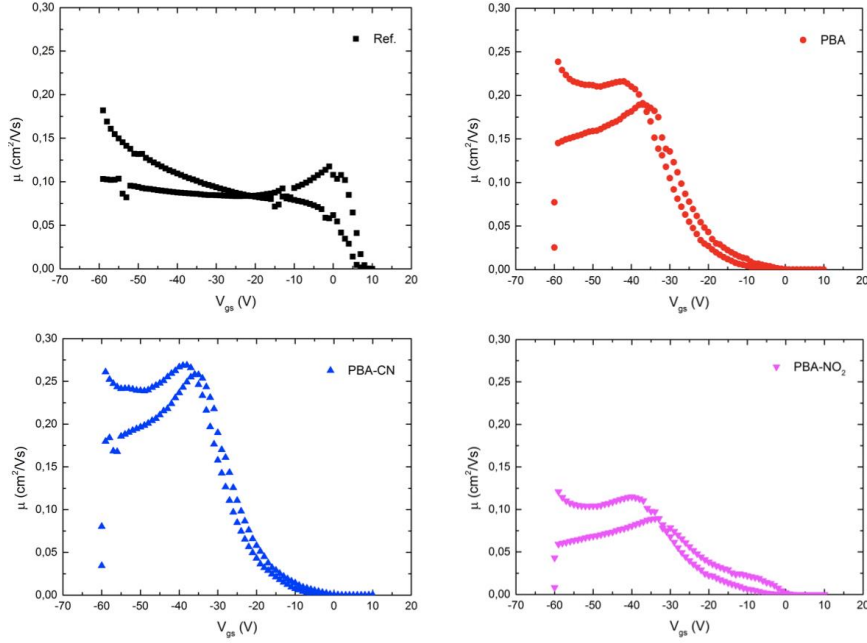
Eşik gerilim değeri, -6.93 V ile -17.90 V arasında değişiklik göstermektedir. PBA ve PBA-CN ile elde edilmiş transistörlerin, Ref. transistöre göre eşik gerilim değerinin negatif yönde; PBA-NO₂ ile elde edilmiş transistörlerin ise Ref. transistöre göre pozitif yönde kaymış olduğu görülmektedir. Organik transistörlerde "bias gerilimi" olarak adlandırılan bu durum en önemli kararlılık sorunlarının biridir. Eşik gerilimi, kapı geriliminin uygulama zamanına, ışığa, kapı yalıtkanının polarize olup olmadığına, kontak direncine, kapı yalıtkanının çalışma fonksiyonuna, yalıtkan katmanın kapasitansına, yarıiletkenin kalınlığına ya da kullanılan yarıiletkene göre değişebilmektedir [24]. Ayrıca SAM moleküllerinin dipollerine ve kimyasal yapısına, SAM molekülünün zincir uzunluğuna da bağlı olarak değişmektedir [25]. Eğriler, hareketliliğin değişmeden kaldığı negatif yönde kaymıştır. Bu davranış, kapı bias stresinin, V_{th} kaymasının tipik bir örneğidir [26] ve bu çalışmada PBA ve PBA-CN ile elde edilmiş transistörler de bu durum gözlenmiştir.



Şekil 4. *n*-Si/SiO₂ yalıtkan yüzeyleri üzerinde SAM molekülleri biriktirilmeden ve biriktirildikten sonra üretilen OFET'lerin (a) Transfer karakteristikleri (b) Çıktı karakteristiği

Referans transistörün transfer karakteristiği ve elektriksel parametreler göz önüne alındığında *n*-Si/SiO₂ yüzeyindeki hidroksil gruplarının elektron tuzakları gibi davranmasından dolayı transistör akım kararsızlığı (histerisis etkisi) fazla olduğu görülmektedir [27]. Yalıtkan/yarıiletken arayüzeyi arasında meydana gelen arayüzey tuzaklarının yoğunluğunun fazla olması *SS* değerinin yüksek olmasına neden olmaktadır [28]. *SS* değerinin 5.98 V/Dec'ten PBA için 4.97 V/Dec, PBA- NO_2 için 3.96 V/Dec, PBA-CN için 7.33 V/dec olduğu görülmektedir. PBA ve PBA- NO_2 ile elde edilen transistörlerde iyileşme olduğu anlaşılmaktadır.

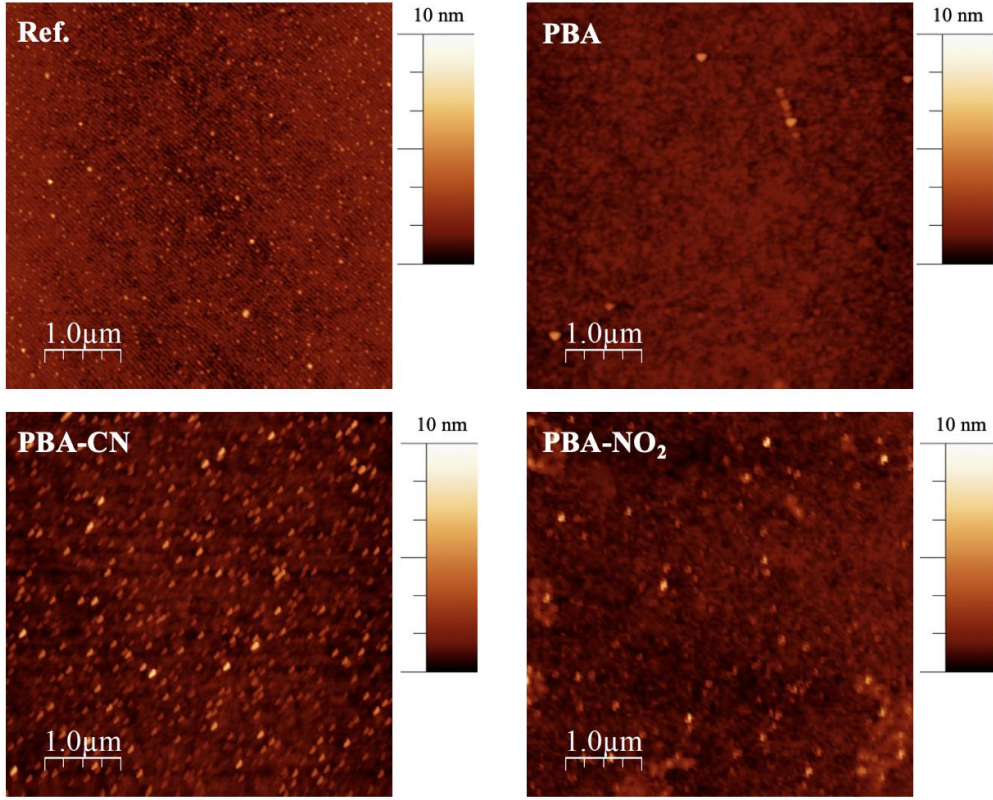
Şekil 5, hem referans hem de SAM molekülü biriktirilmiş aygıtlar için kapı gerilimine (V_{gs}) karşı doyum bölgesindeki yük hareketliliğini göstermektedir. Yük hareketliliği referans aygıtta, 10 V'luk bir kapı gerilimi için maksimum $0.11 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 'ye ulaşır ve daha sonra uygulana gerilim arttıkça yük hareketliliği azalmaya başlar. Hareketlilikteki ilk artış, kaynak elektrottan kanala boşluk enjeksiyonunun başlamasına işaret etmektedir. Kanala enjekte edilen boşluklar önce kütle ve arayüz tuzaklarını doldurmaktadır. Gerilim arttıkça yük hareketliliği, transistör kanalı boyunca devam etmektedir ve yük hareketliliğinde artışa neden olmaktadır. PBA ve PBA-CN SAM molekülü biriktirilen transistörlerin yük hareketliliği, referans aygıtı göre artış göstermiştir.



Şekil 5. Doyum bölgesindeki yük hareketliliği eğrisi

Yalıtkan/yarıiletken arayüzeyinin PBA ve türevi SAM molekülleri ile modifiye edilerek elde edilen transistörlerin transfer karakteristikleri ve elektriksel parametreler dikkate alındığında, PBA-CN ile elde edilen transistör hariç diğer transistörlerin transfer karakteristiklerinde akım kararsızlığının önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Buna bağlı olarak histerisis etkisi azalmıştır. PBA-NO₂ ile elde edilen transistör hariç elde edilen transistörlerin boşluk yük hareketliliğinin hem lineer bölgede hem de doyum bölgesinde artış olduğu gözlemlenmiştir. Böylece yalıtkan/yarıiletken arayüzeyindeki tuzakların azaldığı anlaşılmaktadır. Transistörün açık ve kapalı durumdaki akım değeri oranının artış göstermesi ve SS değerinin genel olarak düşmüş olması transistörde daha kısa sürede daha fazla yük birikiminin meydana geldiğini göstermektedir.

SAM moleküllerinin yüzeye biriktirilmesiyle kontak direncinin azalması yüzey morfolojisinden kaynaklanabilmektedir. Bu sebeple mekanizmayı doğrulamak için, SAM molekülleri biriktirmeden önce ve sonra atomik kuvvet mikroskobu (AFM) yardımıyla yüzey morfolojisinin ölçümleri gerçekleştirilmiştir [29]. Şekil 6'te gösterilen SAM moleküllerinin yalıtkan yüzeye biriktirilmesiyle, yalıtkan yüzeyin morfolojisinde gözle görülür farklılıklar gözlemlenmiştir. Yalıtkan yüzeyin ortalama kare pürüzlülüğü 0.3 nm 'dir. SAM moleküllerinin yüzeye birikiminin ardından ortalama yüzey pürüzlülüğü $0.5 \text{ nm} - 0.6 \text{ nm}$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 6. Kendiliğinden birikme sürecine maruz bırakılmamış ve bırakılmış yalıtkan yüzeylerin $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ boyutlarında alınan AFM görüntüleri

PBA ve türevi SAM moleküllerinin angström boyutunda olması ve alkil zincirine sahip olmaması yüzey pürüzlülüğüne önemli bir değişiklik göstermemiştir. Ancak *n*-Si/SiO₂ yüzeylerde, silolanlar yüzeydeki silanol (-Si-OH) grupları çok güçlü Si-O-Si bağı sayesinde doğal kendiliğinden birikme oluşturmaktadır [30].

IV. SONUÇ

Sonuç olarak, fenilboronik asit ve türevi moleküllerinin kendiliğinden birikme sürecine maruz bırakılmamış ve bırakılmış *n*-Si/SiO₂ yüzeylerinin, DNTT organik yarıiletkeni arasındaki yalıtkan/yarıiletken arayüzünün organik alan etkili transistör performansına etkisi incelenmiştir. Fenilboronik asit ve türevi moleküllerinin kullanarak kendiliğinden birikme sürecine maruz bırakılmış olan yüzeylerle elde edilen transistörlerin cihaz performansının genel olarak artmış olduğu görülmüştür. PBA ve PBA-CN SAM molekülü biriktirilen transistörlerin yük hareketliliği, referans aygıtı göre artış göstermiş olup, PBA ve PBA-NO₂ molekülü biriktirilen transistörlerin eşik gerilim altı eğimi (*SS*) değerinin azalmış olması, boşluk yük hareketliliğinin artmış olması yüzey tuzaklarının azalmış olduğunu göstermiştir. Aygıtlardaki açma/kapama oranının da önemli bir değişiklik olmadığı görülmüştür. *n*-Si/SiO₂ yüzeyindeki hidroksil gruplarının elektron tuzakları gibi davranması, SAM molekülüne maruz bırakılan aygıtlarda histerisis etkisinin biraz artmasına neden olmuştur. Fenilboronik asit ve türevi moleküllerin, yalıtkan yüzeyin pasivasyonu yoluyla elde edilen transistörlerin performansını iyileştirmede umut verici olabileceğini göstermektedir.

TEŞEKKÜR: Çalışmanın deneysel aşamasındaki desteklerinden dolayı Dr. Mustafa Can ve Dr. Mamatimin Abbas'a teşekkürlerimi sunarım.

V. KAYNAKLAR

- [1] M. Riordan, L. Hoddeson and C. Herring, "The invention of the transistor", *Reviews of Modern Physics*, vol. 71, no. 2, pp. 336-345, 1999.
- [2] J. Bardeen and W. H. Brattain, "Three-electrode circuit element utilizing semiconductive materials", U.S., 2524034A, 1950.
- [3] J. Bardeen and W. H. Brattain, "The transistor, a semi-conductor triode", *Phys. Rev.*, vol. 74, no. 2, pp. 230-231, 1948.
- [4] H. Shirakawa, E. J. Louis, A. G. MacDiarmid, C. K. Chiang and A. J. Heeger, "Synthesis of electrically conducting organic polymers: halogen derivatives of polyacetylene, (CH)_x", *J. Chem. Soc. Chem. Commun.*, no. 16, pp. 578-580, 1977.
- [5] F. Ebisawa, T. Kurokawa and S. Nara, "Electrical properties of polyacetylene/polysiloxane interface", *J. Appl. Phys.*, vol. 54, no. 6, pp. 3255-3259, 1983.
- [6] A. Tsumura, H. Koezuka and T. Ando, "Macromolecular electronic device: Field-effect transistor with a polythiophene thin film", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 49, no. 18, pp. 1210-1212, 1986.
- [7] Sciencedirect, (19 Ekim 2018). [Online]. Erişim: www.sciencedirect.com
- [8] H. Sirringhaus, "25th anniversary article: organic field-effect transistors: the path beyond amorphous silicon", *Adv. Mater.*, vol. 26, pp. 1319-1335, 2014.
- [9] I. Kyymissis, C.D. Dimitrakopoulos and S. Purushothaman, "High performance bottom electrode organic thin-film transistors", *IEEE Trans. Electron Device*, vol. 48, no. 6, pp. 1060-1064, 2001.
- [10] H. Klauk, *Organic Electronics, Materials, Manufacturing and Applications*, 2nd ed., Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2006, ch. 1, pp. 1-32.
- [11] H. Klauk, "Organic thin-film transistors", *Chem. Soc. Rev.*, vol. 39, no. 7, pp. 2643-2666, 2010.
- [12] W. L. A. Brooks and B. S. Sumerlin, "Synthesis and Applications of Boronic Acid-Containing Polymers: From Materials to Medicine", *Chem. Rev.*, vol. 116, no. 3, pp. 1375-1397, 2016.
- [13] K. Lacina, P. Skládal and T. D. James, "Boronic acids for sensing and other applications - a mini-review of papers published in 2013", *Chem. Cent. J.*, vol. 8, no.1, pp. 60, 2014.

- [14] T. Yılmaz Alıç, "The effect of phenylboronic acid-based self-assembled monolayers on the performance of organic field-effect transistors (OFETs)", *Turk. J. Phys.*, vol. 43, pp. 207 – 212, 2019.
- [15] D. Akın Kara, K. Kara, G. Oylumluoglu, M. Z. Yigit, M. Can, J. J. Kim, E. K. Burnett, D. L. Gonzalez Arellano, S. Buyukcelebi, F. Ozel, O. Usluer, A. L. Briseno and M. Kus, "Enhanced Device Efficiency and Long-Term Stability via Boronic Acid-Based Self-Assembled Monolayer Modification of Indium Tin Oxide in a Planar Perovskite Solar Cell", *ACS App. Mat. & Int.*, vol. 10, no. 35, pp. 30000-30007, 2018.
- [16] J.-I. Anzai, "Recent progress in electrochemical biosensors based on phenylboronic acid and derivatives", *Mat. Sci. and Eng. C.*, vol. 67, pp. 737-746, 2016.
- [17] T. Minami, T. Minamiki, Y. Hashima, D. Yokoyama, T. Sekine, K. Fukuda, D. Kumaki and S. Tokito, "An extended-gate type organic field effect transistor functionalised by phenylboronic acid for saccharide detection in water", *Chem. Comm.*, vol. 50, no. 98, pp. 15613-15615, 2014.
- [18] Y. Egawa, T. Seki, S. Takahashi and J.-i. Anzai, "Electrochemical and optical sugar sensors based on phenylboronic acid and its derivatives", *Mat. Sci. and Eng. C.*, vol. 31, no. 7, pp. 1257-1264, 2011.
- [19] J. W. Ward, "Enhancing The Electrical Performance Of Organic Field-Effect Transistors Through Interface Engineering, Physics", PhD Thesis, Wake Forest University, North Carolina, USA, 2015.
- [20] G. Horowitz, "Interfaces in organic field-effect transistors", *Adv. Polym. Sci.*, vol. 223, pp. 113-153, 2010.
- [21] N. K. Za'aba, J. J. Morrison and D. M. Taylor, "Effect of relative humidity and temperature on the stability of DNNT transistors: A density of states investigation", *Org. Elec.*, vol. 45, pp. 174-181, 2017.
- [22] U. Zschieschang, F. Ante, D. Kälblein, T. Yamamoto, K. Takimiya, H. Kuwabara, M. Ikeda, T. Sekitani, T. Someya, J. B. Nimoth and H. Klauk, "Dinaphtho[2,3-b:2',3'-f]thieno[3,2-b]thiophene (DNNT) thin-film transistors with improved performance and stability", *Org. Elec.*, vol. 12, no. 8, pp. 1370-1375, 2011.
- [23] A. Kyndiah, A. Ablat, S. Guyot-Reeb, T. Schultz, F. Zu, N. Koch, P. Amsalem, S. Chiodini, T. Yılmaz Alic, Y. Topal, M. Kus, L. Hirsch, S. Fasquel and M. Abbas, "A Multifunctional Interlayer for Solution Processed High Performance Indium Oxide Transistors", *Sci. Rep.*, vol. 8, no.1, pp. 10946, 2018.
- [24] K. P. Pernstich, S. Haas, D. Oberhoff, C. Goldmann, D. J. Gundlach, B. Batlogg, A. N. Rashid and G. Schitter, "Threshold voltage shift in organic field effect transistors by dipole monolayers on the gate insulator", *J. of App. Phys.*, vol. 96, no. 11, pp. 6431-6438, 2004.
- [25] M. Aghamohammadi, R. Rödel, U. Zschieschang, C. Ocal, H. Boschker, R. T. Weitz, E. Barrena and H. Klauk, "Threshold-Voltage Shifts in Organic Transistors Due to Self-Assembled

Monolayers at the Dielectric: Evidence for Electronic Coupling and Dipolar Effects", *ACS App. Mat. & Int.*, vol. 7, no. 41, pp. 22775-22785, 2015.

[26] K. Suemori, S. Uemura, M. Yoshida, S. Hoshino, N. Takada, T. Kodzasa and T. Kamata, "Threshold voltage stability of organic field-effect transistors for various chemical species in the insulator surface", *App. Phys. Lett.*, vol. 91, no. 19, pp. 192112, 2007.

[27] M. H. Yoon, C. Kim, A. Facchetti and T. J. Marks, "Gate dielectric chemical structure-organic field-effect transistor performance correlations for electron, hole, and ambipolar organic semiconductors", *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 128, pp. 12851–12869, 2006.

[28] L. Jong-Son, N. Kee-Soo and L. Choochon, "Determination of the Interface Trap Density in Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor through Subthreshold Slope Measurement", *Japanese J. of App. Phys.*, vol. 32, no. 10R, pp. 4393, 1993.

[29] R. García and R. Pérez, "Dynamic atomic force microscopy methods", *Sur. Sci. Rep.*, vol. 47, no.6-8, pp. 197-201, 2002.

[30] E. P. Plueddemann, *Silane Coupling Agents*, 2nd ed., New York, US: Springer, 1991, ch. 4, pp. 79-114.